1980—2017年青海省地表温度时空变化特征

赵美亮[1,2,3]，曹广超[2,3]，曹生奎[1,2,3]，刘富刚[4]，袁 杰[1,2,3]，
张 卓[1,2,3]，刁二龙[1,2,3]，付建新[5]

（1. 青海师范大学地理科学学院，青海 西宁 810008；2. 青海省自然地理与环境过程重点实验室，青海 西宁 810008；3. 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室，青海 西宁 810008；4. 德州学院资源环境与规划学院，山东 德州 253023；5. 太原师范学院城镇与区域发展研究所，山西 晋中 030619）

摘　要：地表温度是区域气候、农业生产及土壤养分的重要影响因素，分析地表温度的变化规律对深入了解气候变化的原因及农业生产的布局具有重要意义。基于青海省35个气象基站1980—2017年逐日地表温度、气温和风速数据，采用线性趋势分析、Mann-Kendall非参数检验、小波分析等数理统计方法对青海省地表温度的时空变化特征及其与气温、风速、海拔等因子的关系进行了研究。结果表明：(1) 青海省年均地表温度呈波动上升的趋势，增温速率达0.68 ℃·$(10a)^{-1}$($P<0.01$)，2001年发生突变；地表温度变化存在明显的季节差异，冬季地温变化速率最明显，为0.77 ℃·$(10a)^{-1}$($P<0.01$)，其他季节差异不大；青海省年均地表温度具有4~7 a和11~16 a两种周期变化；(2) 全年地表平均温度分别在青南高原和祁连山区形成2个低温区，在柴达木盆地和东部农业区形成2个高温区，且低温区的增温速率较大；(3) 全年及各季地表平均温度与平均气温呈显著正相关，与风速、海拔呈显著负相关关系；(4) 地表平均温度呈现出明显的垂直递减规律且海拔高的地区变暖趋势更加明显。

关键词：地表温度；时空变化；海拔；青海省

第五次发布的IPCC报告指出，地球表面平均温度自1880—2012年大约升温0.85 ℃，近千年来，平均温度最高的30 a可能出现在北半球的1983—2012年之间[1]。已有研究表明，1961—2010年我国0 cm地温每10 a约上升0.34 ℃[2]，较全球同期水平高0.22 ℃·$(10a)^{-1}$[3]。气候变化对土壤的影响通过地表温度反映出来，将直接影响下垫面的反射率及土壤的湿润状况，进而对土壤肥力、水盐运移及土壤微生物产生影响[4-6]。地表温度升高可能对土壤理化性质产生一定的影响[7]，对高海拔地区交通设施等造成不同程度的影响[8]。因此，全面了解地温的变化规律对农业生产的布局、生态系统的保护及高海拔地区的工程建设具有重大的意义。

我国众多学者对全球气候变暖背景下地温变化的研究兴趣不断增加，如王佳琳等[2]采用Mann-Kendall检验等方法，对中国0 cm地温的时空变化特征进行研究发现，全国0 cm地温均在2000年左右发生突变；程清平等[9]指出云南省的地温变化可能受周边地区大气环流的影响；王雪娇等[10]研究新疆0 cm地温变化指出，风速的降低有助于地表平均温度的升高；张威等[11]研究表明，辽宁省地表平均温度的周期变化为19~25 a和30~46 a。青海省是青藏高原的重要组成部分，地处其东北部，同时也是许多国内重要河流的发源地，青海省作为气候变化的敏感区，其地表平均温度的快速变化同样吸引了众多学者的研究兴趣。已有研究结果表明，自1950年以来，青藏高原一直处于明显的升温阶段，其中冬季的升温变化速率最高[12]；张焕平等[13]基于统计方法研究青海省浅层地温的变化特征，发现5~20 cm地温呈现上升趋势；韩有香等[14]对1963—2017年青海

收稿日期：2020-02-27；　**修订日期：**2020-06-04
基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFC0404304)；青海省科技厅重大专项项目(2019-SF-A4)；青海省自然科学基金项目(2018-ZJ-903)；青海省"高端创新人才千人计划"端青人才字[2016]32号)资助
作者简介：赵美亮(1995-)，男，硕士研究生，研究方向为地表环境过程. E-mail: zhaomeiliang2014@163.com
通讯作者：曹广超. E-mail: caoguangchao@126.com

省久治县0 cm地温变化特征研究发现,久治地区地表温度每10 a约上升0.626 ℃。地温在全球气候变化背景下呈显著升高趋势已成为共识,青海高原地区地表温度的研究主要集中在深层地温和单个站点的研究,对其地表平均温度分布变化的规律及影响因素研究较少。

本文基于1980—2017年青海省35个气象台站逐日地表平均温度、气温及风速等观测数据,运用Mann-Kendall分析法、一元线性回归模型、小波周期分析和相关分析等数理统计方法,对青海省地表平均温度的时空变化特征及其影响因素进行系统的分析,以期为青海省的地表温度和气候变化研究提供有价值的数据,同时对合理调整农牧业生产布局及生态文明建设具有一定的参考价值。

1 数据与方法

1.1 数据来源

选用1980年1月1日至2017年12月31日青海省35个数据较完整的气象站(图1)逐日地表平均温度、气温及风速观测数据,研究青海省过去38 a地表平均温度的时空变化特征,所用气象数据来自中国气象数据网(http://data.cma.cn/)。青海省1980—2017年35个气象台站各季和年内逐日数据的平均值分别为四季及全年地表平均温度,35个气象台站的平均值为青海省各要素的平均值。

1.2 研究方法

通过一元线性回归模型确定青海省地表平均温度的气候倾向率[15];采用Mann-Kendall突变检验法[15-18]研究地表温度的突变特征;地表温度的周期变化特征通过对其进行小波分析得出[19-21];基于气象和海拔数据,采用相关分析法[22]研究各要素之间的相关关系。

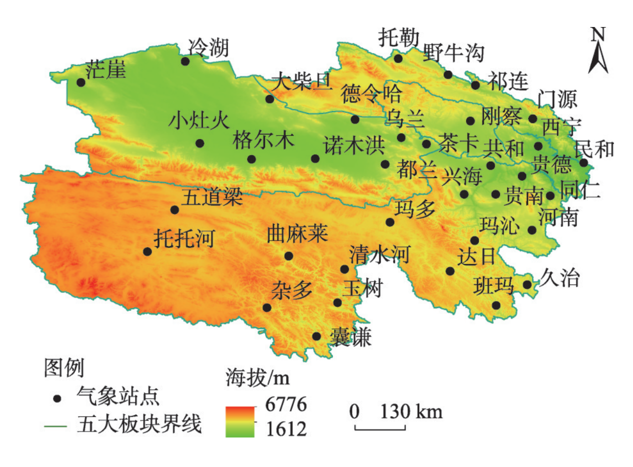


图1 研究区域及气象站点分布示意图

Fig. 1 Study area and the meteorological station distribution

1.2.1 气候倾向率 基于一元线性回归方程(式1)来计算地表平均温度的倾向率,用于定量分析其变化趋势。计算公式为[15]:

$$LST = a + bt_i \tag{1}$$

式中:LST为地表平均温度因子;a为常数项;t_i为时间序列;b为倾向率。

1.2.2 Mann-Kendall突变检验 Mann-Kendall突变检验是一种非参数统计检验方法,其主要优势是样本不需要服从正态分布[15-17,23]。计算公式为[15]:

对于含有n个样本量的时间序列x,构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^{k} r_{ij} \quad (2 \le k \le n) \tag{2}$$

其中
$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \le x_j \end{cases} \quad (1 \le j \le i) \tag{3}$$

定义统计变量:

$$UF_k = \frac{[S_k - \bar{S}_k]}{\sqrt{\mathrm{Var}(s_k)}} \quad (1 \le k \le n) \tag{4}$$

给出显著性水平0.05,得到Ua两条临界值线±1.96。当正向序列UF大于0时,表明序列呈明显的上升趋势,反之,呈下降趋势。当超出Ua临界值线时,趋势显著。正向序列UF与逆向序列UB在置信区间内出现交点便是突变开始的时间,若UF、UB出现多个交点,需结合滑动t检验、pettitt等方法确定突变点[15]。

1.2.3 小波分析 小波分析是基于小波函数系来表示某一信号的方法[9,21],它可以揭示某一现象在时间序列的变化周期,反映其变化趋势。其表达式为[9]:

$$\mathrm{cmor}(x) = \frac{\sigma^{2i\pi x F_c} * \frac{x^2}{F_b}}{\sqrt{\pi F_b}} \tag{5}$$

式中:F_b是频带宽度系数;F_c是wavelet的中心频率;π,e是常数。将小波系数的平方值在时间平移域(b)上积分,便可得到小波方差var,即[21]:

$$\mathrm{var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} w_f |(a, b)|^2 \mathrm{d}b \tag{6}$$

var是随时间周期a的变化分布图,称为小波方差分布图。它能直观的反映信号波动能量随周期的分布[24],可用于确定不同震荡周期的相对强度和

震荡主周期。小波方差图体现信号随时间尺度的分布，表明小波方差随时间尺度的变化过程。因此，信号中主要时间尺度周期可由小波方差图检验得到[25]。

1.2.4 相关分析　相关系数是用来衡量两个变量之间密切程度的统计量。其公式为[22]：

$$r_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{7}$$

式中：r为两个变量x与y之间的相关系数，其取值介于[−1,1]之间；n为样本量；x_i、y_i分别代表第i个序列值。当$r>0$时，表明两变量呈正相关；反之，为负相关。给定显著性水平α，若$|r|>r_\alpha$。表明相关是显著的，否则是不显著的。

2 结果分析

2.1 青海省地表平均温度的时间变化

2.1.1 地表平均温度年际变化特征　由图2a可知，青海省在过去38 a的地表平均温度为5.45 ℃，增温速率是0.68 ℃·(10a)$^{-1}$($P<0.01$)，说明青海省地表平均温度在过去38 a中呈显著性上升趋势。期间，1983年青海省地表平均温度降至38 a来最低值(3.75 ℃)；2016年达到最高值(6.89 ℃)，这一研究结果与彭海等[26]关于青藏高原地表平均温度变化特征的研究结论一致。青海省1997—2000年地表平均温度波动明显，先是迅速上升1.08 ℃，随后又快速下降至多年地表平均温度以下。1980—1998年青海省地表平均温度低于多年平均值，地表平均温

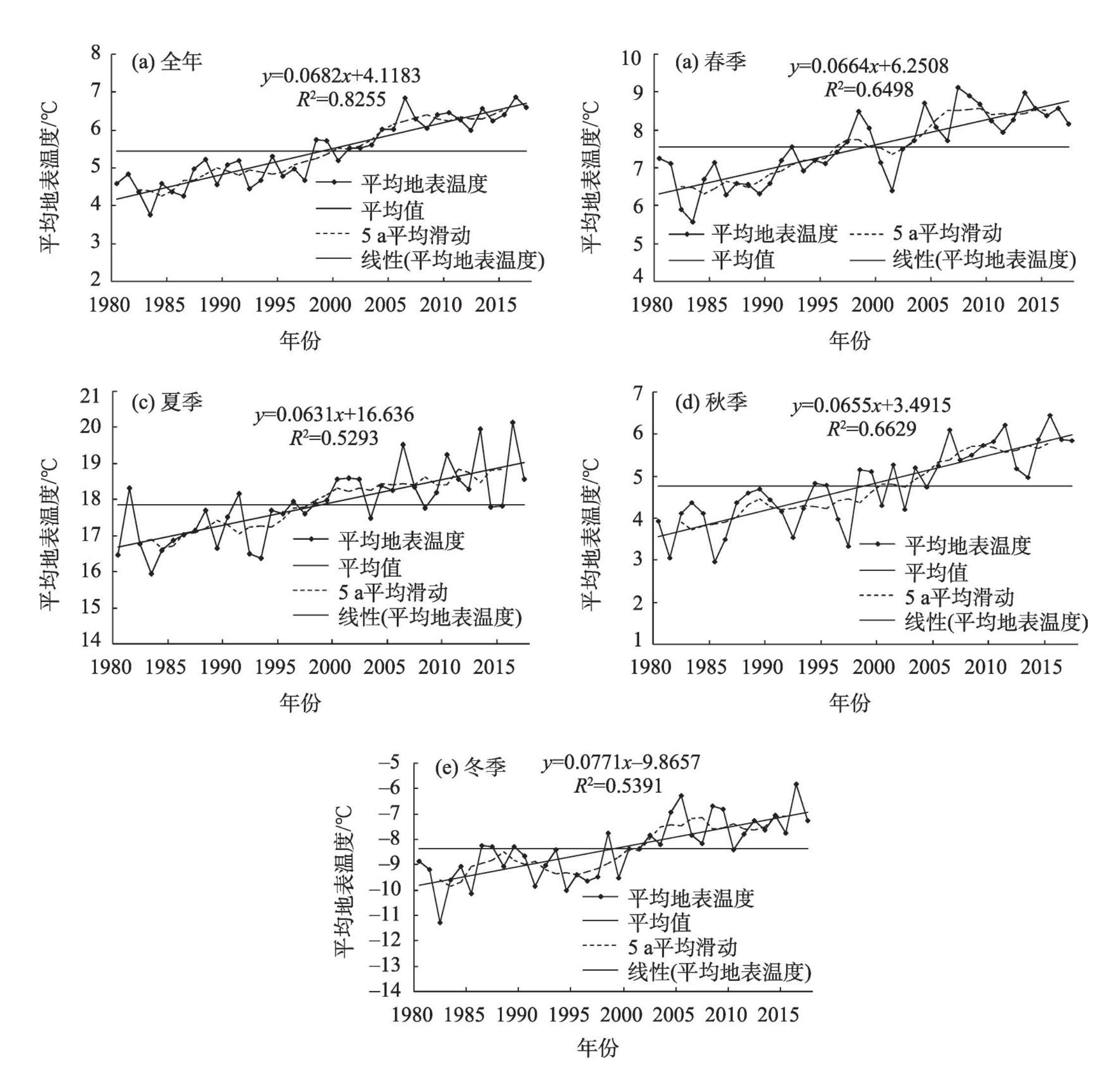


图2　1980—2017年青海省地表温度全年、季节变化特征

Fig. 2　Annual and seasonal variation characteristics of land surface temperature during the period from 1980 to 2017 in Qinghai Province

度自2001年以来均高于多年平均水平;青海省地表平均温度的变化规律呈现出波动上升的趋势。

由图2可知,青海省四季地表平均温度均呈现上升的趋势,升温幅度为:夏季<秋季<春季<冬季,其中冬季升温幅度最高,这与青海省四季平均气温的增温幅度一致(冬季平均气温增长幅度最大,为0.58 ℃·$(10a)^{-1}$($P<0.01$)),这一研究结果与王佳琳等[2]关于青藏地区0 cm地温的研究一致。就5 a平均滑动曲线来说,冬季5 a地表平均温度滑动曲线较其他季节的变化更为剧烈,表明冬季地表平均温度上升最明显。综上所述,青海省全年及四季尺度上地表平均温度呈现出显著增高的趋势,其中冬季的增温贡献率最大。

2.1.2 地表平均温度突变特征分析 通过Mann-Kendall检验表明,1980—2017年青海省全年及四季地表平均温度均在2000年左右发生突变(图3)。春季和夏季的突变年份早于全年,其突变点分别出现在1997年和1996年,而秋、冬季节的突变较晚,均发生在2002年;其突变后均表现出升温现象。其中,全年地表平均温度突变前为4.82 ℃,突变后上升了1.4 ℃;通过分析全年地表平均温度的特征曲线*UF*可知,1986年以前地表平均温度处于下降阶段,随后稳步上升并且在1998年超过信度曲线,增温趋势明显。

就四季地表平均温度来说,春季地表平均温度在突变前为6.84 ℃,突变后上升了1.34 ℃;夏季地表平均温度突变后升温最低,较突变前上升1.31 ℃;秋季地表平均温度在突变前为4.22 ℃,突变后上升了1.39 ℃;冬季地表平均温度在突变前为−9.05 ℃,突变后上升了1.74 ℃。结合表1和图3可知,冬季地表平均温度的升温趋势最为显著。

2.1.3 地表平均温度周期分析 为分析青海省地表平均温度在时间序列的周期变化情况,了解其变化趋势。本文以1980—2017年青海省地表平均温度序列数据为基础,基于Morlet复小波函数分析青海省地表平均温度的周期性变化特征(图4)。1980—2017年青海省全年地表平均温度的周期性变化以4~7 a和11~16 a为主,其中11~16 a时间尺度上的周期性变化在整个研究时段内均有体现,分别有5个高值中心和4个低值中心;同时24~30 a尺度的周期

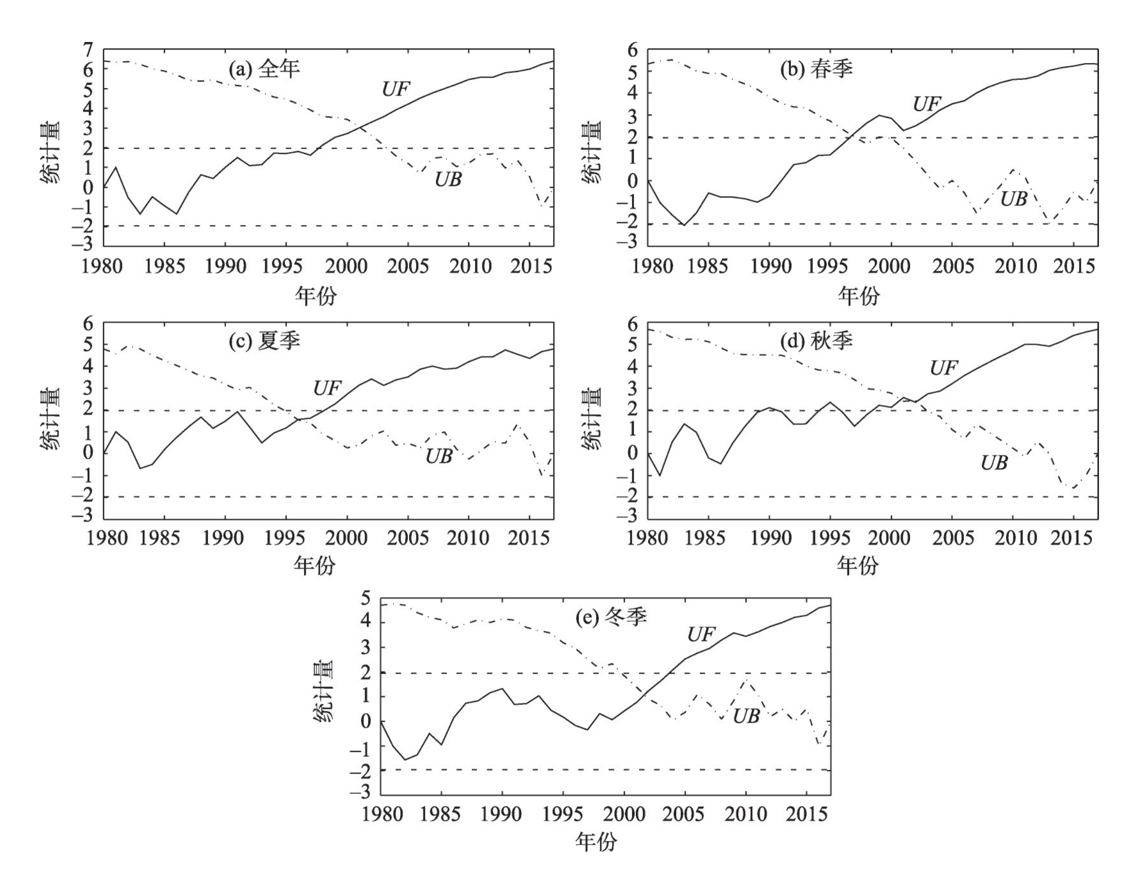


图3 1980—2017年青海省各季节、全年地表温度Mann-Kendall检验曲线

Fig. 3 Mann-Kendall test curve of surface temperature for each season and year in Qinghai Province from 1980 to 2017

表1 1980—2017年青海省各季节、全年地表温度与影响因素相关系数

Tab. 1 The correlation coefficient between land surface temperature and influencing factors in different seasons and whole year in Qinghai Province from 1980 to 2017

	全年	春季	夏季	秋季	冬季
气温	0.964**	0.943**	0.971**	0.942**	0.948**
风速	−0.604**	−0.648**	−0.583**	−0.644**	−0.045
海拔	−0.851**	−0.891**	−0.855**	−0.805**	−0.549**

注:**表示通过0.01显著性检验。

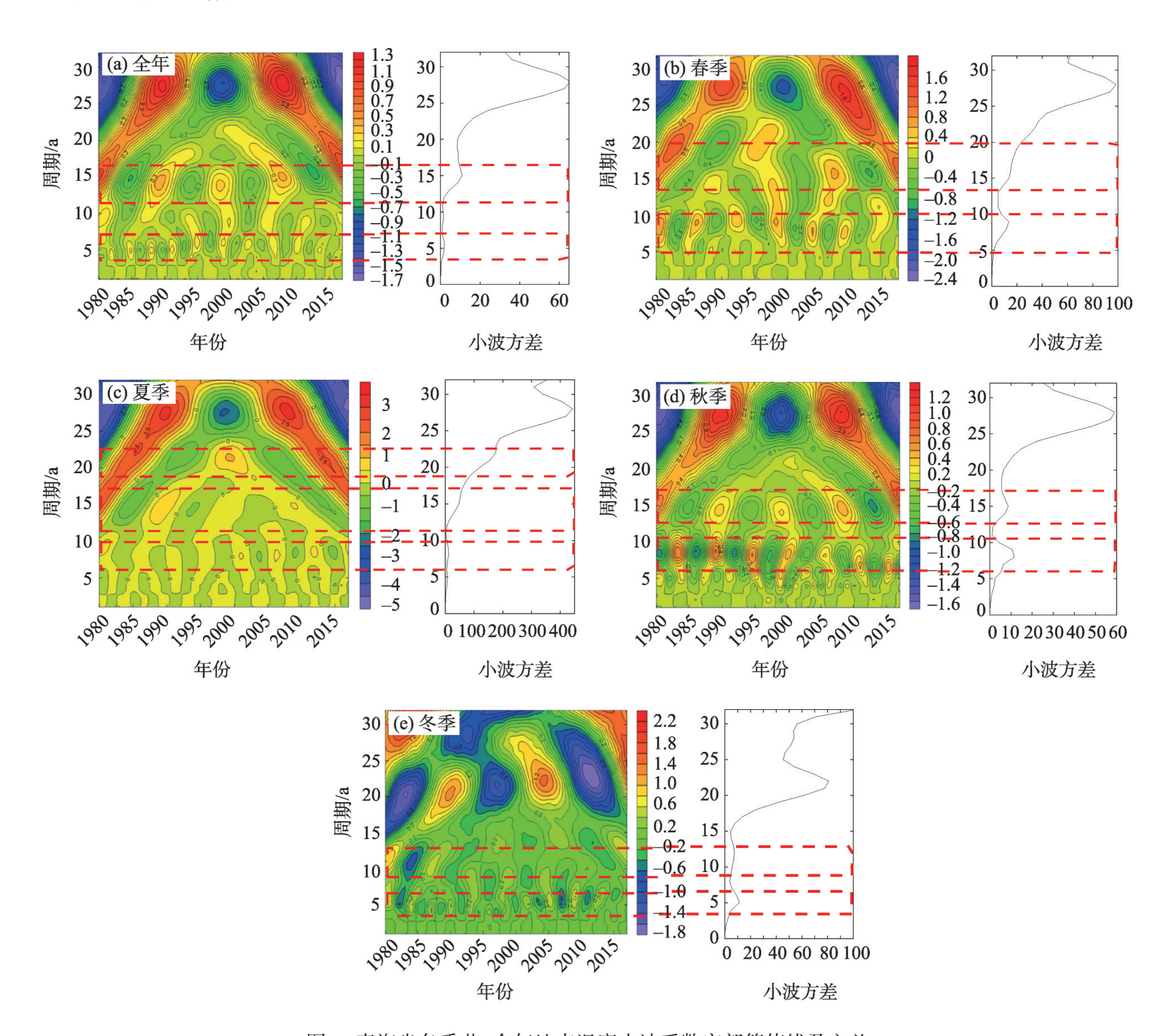


图4 青海省各季节、全年地表温度小波系数实部等值线及方差

Fig. 4 Real contour and variance map of annual temperature and seasonal wavelet coefficient of surface temperature in Qinghai Province

变化存在明显的震荡,表明地表平均温度可能呈现出一定的周期变化。小波方差图(图4)显示青海省全年地表平均温度年际变化存在3个峰值,对应3个变化周期,分别为5 a、15 a、27 a尺度。但本文的时间尺度为38 a,故无法确定24~30 a周期变化(下同)。春季地表平均温度的周期性变化主要体现在5~10 a和14~20 a两个时间尺度上。其中,5~10 a的周期变化基本体现在整个研究周期,14~20 a的变化出现在20世纪80—90年代和2005年以后较为强烈,且均呈现出“高—低”形态的变化。从图4c可以

看出,夏季地表平均温度的周期性变化较为复杂,主要表现在3个时间尺度上;18~22 a尺度的变化主要发生在1990—2004年,11~17 a尺度的变化主要发生在1980—1995年,1995年以来,该周期性变化开始减弱,2000年前后6~10 a尺度的变化开始占据主导地位,呈现出"高—低"形态的交替变化。秋季地表平均温度在5~11 a和13~16 a的时间尺度上有2个周期变化,分别对应于小波方差图上的2个峰值,具有明显的周期振荡,其中5~11 a的变化呈现出"低—高"形态的交替变化,13~16 a的变化形态与之相反。冬季地表平均温度经历了2种时间尺度的中4~6 a尺度的周期变化基本经历了整个研究周期。

2.2 青海省地表平均温度的空间分布特征

通过对1980—2017年青海省38个气象台站地表平均温度实测数据分析可知,青海省多年地表平均温度的变化幅度在-0.58~11.34 ℃之间,平均值为5.45 ℃,区域多年地表平均温度差值达11.92 ℃,总体表现为"南北山区低,中间高"的空间分布特征,地表平均温度随海拔高度的升高而表现出明显的垂直递减规律(图5)。在空间分布上:形成2个低温区,一个出现在青南高原地区,最低值出现在五道梁站(-0.58 ℃,4626 m),另一个出现在祁连山南坡的托勒-野牛沟区域,最低值出现在野牛沟站(1.18 ℃,3566 m);此外,还分别以东部农业区(民和站:11.34 ℃,1745 m)和柴达木盆地(格尔木:8.96 ℃,2808 m)形成2个高温区。值得注意的是,地处青南高原东南部的囊谦站地表平均温度较高,这与朱伊等[27]、王佳琳等[2]的研究结论一致。这可能与其位于河谷,地势较低以及印度洋暖湿气流的影响有关。

从图5b可以看出,1980—2017年青海省地表平均气温的倾向率均为正值,说明38 a来,青海省地表平均温度呈现出变暖趋势。通过对青海省不同区域增温速率分析发现:青海西部部分地区、青南高原及祁连山一带的增温速率大于东部农业区。增温幅度最高的气象台站为大柴旦站[1.11 ℃·(10a)$^{-1}$],次之为清水河站[1.07 ℃·(10a)$^{-1}$],最低值为西宁站[0.11 ℃·(10a)$^{-1}$],次低值为冷湖站[0.14 ℃·(10a)$^{-1}$]。青海省地表平均温度较低的地区气候倾向率呈现出较高的趋势(图5b),由此可见,青海省38 a来地表平均温度的温差呈现出减小的变化趋势。

2.3 青海省地表平均温度变化的影响因素分析

地表温度的变化是一个复杂的过程,包含能量的传输与转化。相关研究表明[28-30]:下垫面性质、太阳辐射强度、大气环流及气象因子是地表平均温度变化的主要影响因素。本文主要基于气温、风速因子与其与地表平均温度之间的关系展开研究。

结合表1和图6可知,青海省地表平均温度与气温在全年及四季中均呈显著的正相关关系,其相关系数在0.942~0.971之间,夏季的相关系数值最大,而秋季的相关系数最小,通过0.01显著性检验,因此,1980—2017年青海省气温的变化对地表温度具有极显著的影响,即青海省全年及四季地表平均温度的变化主要是由气温变化引起的。全年及四季地表平均温度与平均气温的拟合模型如表2所示,春季、夏季与全年回归系数相差不大,气温每升高1 ℃,地表平均温度分别升高1.21 ℃、1.2 ℃和1.22 ℃,秋冬两季分别升高1.11 ℃、1 ℃;标准误差说明全年及秋季的地表平均温度与气温拟合效果

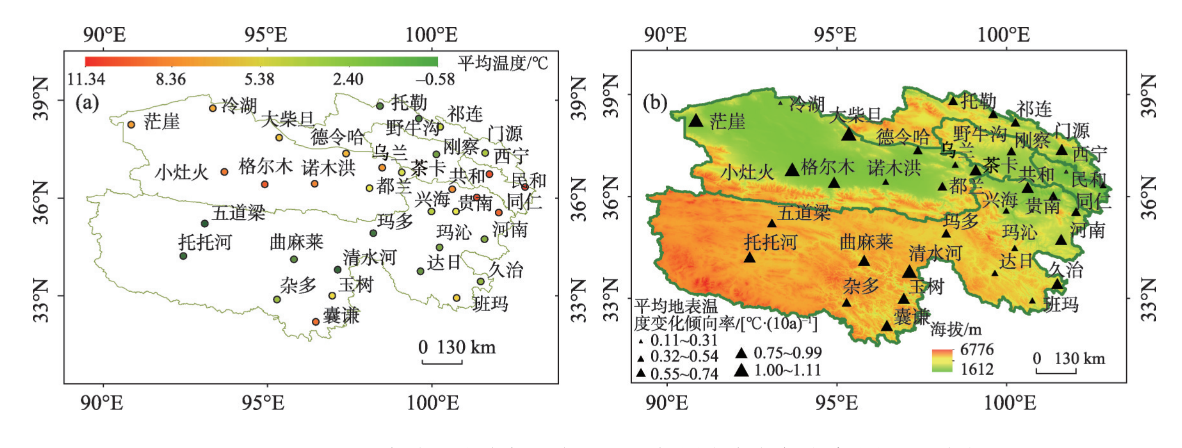


图5 1980—2017年青海省全年地表平均温度(a)与气候倾向率(b)空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of average surface temperature(a) and climate tendency rate (b) in Qinghai Province from 1980 to 2017

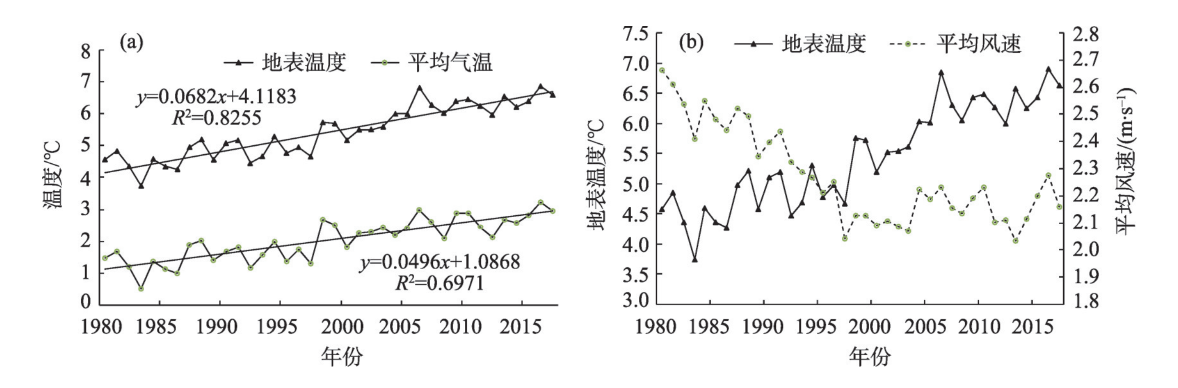


图6 1980—2017年青海省全年平均气温及风速与地表温度变化趋势

Fig. 6 Change trend of average temperature, wind speed and surface temperature in Qinghai Province from 1980 to 2017

表2 1980—2017年青海省平均气温与地表温度回归分析

Tab. 2 Regression analysis of average temperature and surface temperature in Qinghai Province from 1980 to 2017

时间尺度	回归方程	R^2	P值	标准误差
全年	y=1.22x+2.95	0.93	$P<0.01$	0.13
春季	y=1.21x+3.96	0.89	$P<0.01$	0.14
夏季	y=1.2x+2.74	0.94	$P<0.01$	0.15
秋季	y=1.11x+2.47	0.89	$P<0.01$	0.13
冬季	y=x+0.98	0.9	$P<0.01$	0.18

最好。风速与地表温度在全年及四季尺度上呈现出负相关关系，相关系数在-0.648~-0.045之间，除冬季外均通过0.01显著性检验，因此，风速因子对青海省地表平均温度的降低具有促进作用。从图6b可以看出，青海省的风速在研究时段内明显下降，而地表温度呈现的变化趋势与之相反。

基于青海省35个气象台站的海拔数据，对青海省地表平均温度变化与海拔的关系进行分析（表2和图7）。由图1和图5可知，青海省地表平均温度随海拔的上升而呈现出明显的垂直下降规律。相对来说，海拔对春季、夏季地表平均温度的变化影响最大，地表平均温度的垂直变化率分别为0.47 ℃·(100m)$^{-1}$($P<0.01$)和0.54 ℃·(100m)$^{-1}$($P<0.01$)，相关系数分别为-0.891和-0.855，呈显著负相关；海拔与全年及秋季地表平均温度的相关系数分别为-0.851和-0.805，其对应地表平均温度的垂直变化率分别为0.39 ℃·(100m)$^{-1}$($P<0.01$)和0.32 ℃·(100m)($P<0.01$)；冬季地表平均温度的垂直变化率为0.22 ℃·(100m)$^{-1}$($P<0.01$)，受海拔的影响最小，其相关系数为-0.549。由图7f可知，青海省不同海拔处的地表平均温度不同，3000 m以下、3000~4000 m及4000 m以上地表平均温度分别为8.04 ℃、4.69 ℃、1.3 ℃，其增温速率分别为0.65 ℃·(10a)$^{-1}$($P<0.01$)、0.67 ℃·(10a)$^{-1}$($P<0.01$)和0.77 ℃·(10a)$^{-1}$($P<0.01$)，海拔高的地区变暖趋势更加明显。

3 结 论

基于青海省35个气象基站1980—2017年地表温度、气温和风速数据，采用线性趋势分析、Mann-Kendall非参数检验、小波分析等数理统计方法，对青海省地表温度时空变化特征及其与气温、风速、海拔等因子的关系进行研究，主要结论如下：

（1）青海省全年地表平均温度呈波动上升的趋势，增温速率为0.68 ℃·(10a)$^{-1}$($P<0.01$)，在2001年发生突变；地表温度变化存在明显的季节差异，冬季地温变化速率最明显，为0.77 ℃·(10a)$^{-1}$($P<0.01$)，其他季节差异不大。青海省年均地表温度的变化周期为4~7 a和11~16 a两种时间尺度。

（2）青海省全年地表平均温度整体表现为"南北低，中间高"的空间分布特点，分别以柴达木盆地、东部农业区形成2个高值区和青南高原、祁连山地2个低值区。青海省年均地表温度增长率的空间分布上表现为海拔较高的青南地区及祁连山地升温幅度较大，海拔较低的东部农业区及柴达木盆地的部分地区升温幅度较小。

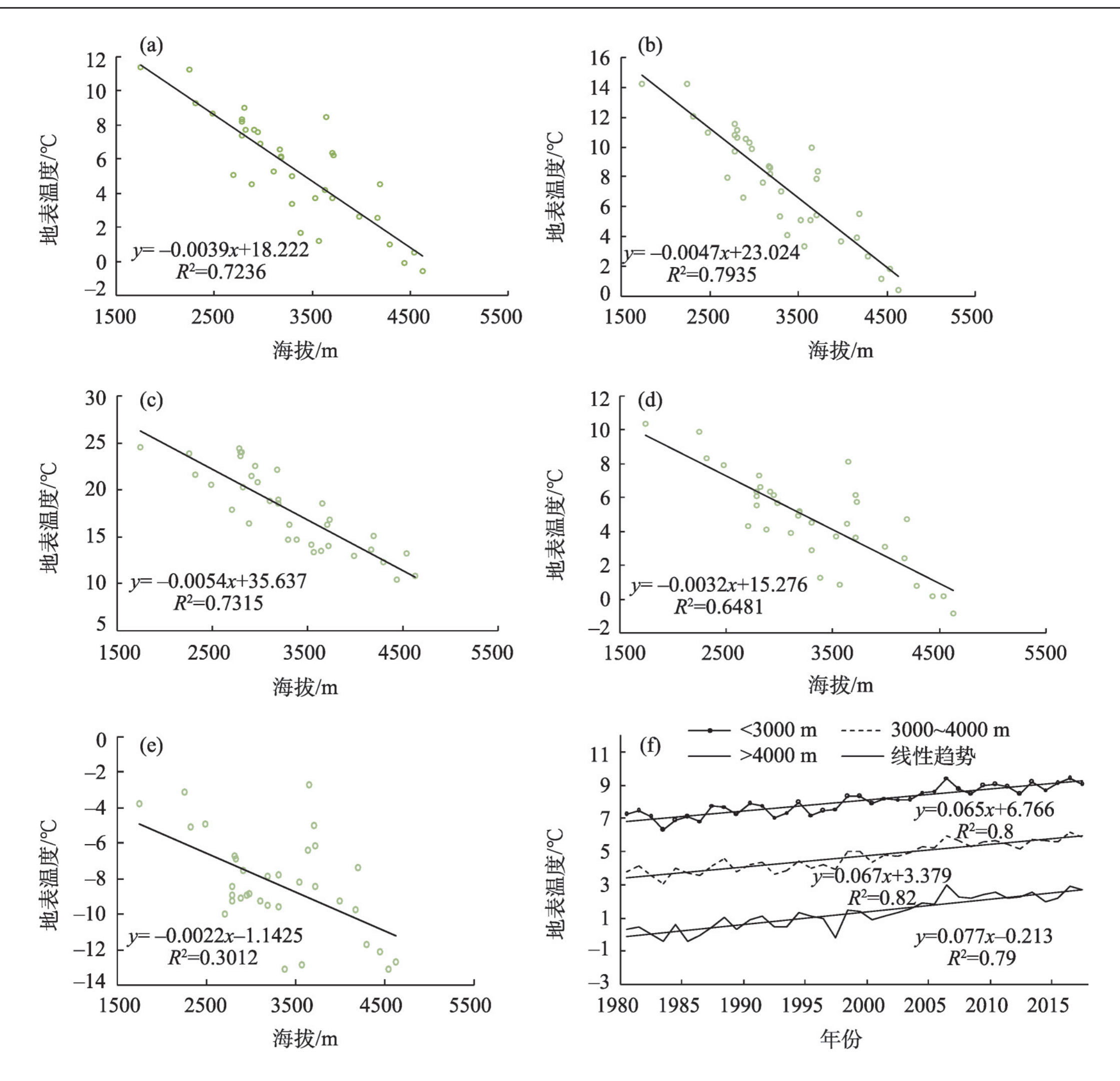


图7 1980—2017年青海省各季、全年地表温度与海拔关系

Fig. 7 Scatter diagram of relationship between annual and seasonal surface temperature and altitude in Qinghai Province from 1980 to 2017

(3)青海省全年及四季的地表平均温度与气温呈显著正相关,其中夏季的相关系数最大;风速与地表温度呈负相关关系。青海省地表温度受经纬度的影响较小,与海拔因素呈现出显著负相关关系,全年和四季的相关系数在-0.891~-0.549之间。

(4)青海省1980—2017年地表平均温度呈现出明显的垂直递减规律;全年地表平均温度的垂直变化率为0.39 ℃·(100m)$^{-1}$($P<0.01$),春季、夏季的垂直变化率高于全年,分别为0.47 ℃·(100m)$^{-1}$($P<0.01$)和0.54 ℃·(100m)$^{-1}$($P<0.01$),秋季、冬季的垂直变化率分别为0.32 ℃·(100m)$^{-1}$($P<0.01$)和0.22 ℃·(100m)$^{-1}$($P<0.01$)。其在3000 m以下、3000~4000 m及4000 m以上增温速率分别为0.65 ℃·(10a)$^{-1}$($P<0.01$)、0.67 ℃·(10a)$^{-1}$($P<0.01$)和0.77 ℃·(10a)$^{-1}$($P<0.01$),海拔高的地区变暖趋势更加明显。

参考文献(References):

[1] IPCC. Summary for Policy Makers of the Synthesis Report of the IPCC Fifth Assessment Report [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[2] 王佳琳, 潘志华, 韩国琳, 等. 1961—2010年中国0 cm地温变化特征及其与气温变化的关系[J]. 资源科学, 2016, 38(9): 1733-1741. [Wang Jialin, Pan Zhihua, Han Guolin, et al. Variation in ground temperature at a depth of 0 cm and the relationship with air temperature in China from 1961 to 2010[J]. Resources Science, 2016, 38(9): 1733-1741.]

[3] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability[M/OL]. Cambridge: Cambridge University Press. http://www.Ipcc.ch/report/ar5/wg2/.

[4] 王风, 宋春雨, 韩晓增, 等. 东北黑土区土壤温度变化特征[J]. 黑

龙江农业科学, 2006(6): 31-33. [Wang Feng, Song Chunyu, Han Xiaozeng, et al. Characteristics of soil temperature dynamics in the black soil area of Northeast China [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2006(6): 31-33.]

[5] 张慧智, 史学正, 于东升, 等. 中国土壤温度的季节性变化及其区域分异研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 227-234. [Zhang Huizhi, Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, et al. Seasonal and regional variations of soil temperature in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(2): 227-234.]

[6] 高振荣, 李红英, 曹淑超, 等. 近31 a河西走廊地区深层地温变化及突变分析[J]. 干旱区地理, 2013, 36(6): 1006-1012. [Gao Zhenrong, Li Hongying, Cao Shuchao, et al. Deep ground temperature variation and mutation of the Hexi Corridor Region in recent 31 years[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(6): 1006-1012.]

[7] 肖辉林. 土壤温度上升与森林衰退[J]. 热带亚热带土壤科学, 1995(4): 246-249. [Xiao Huilin. Increased soil temperature and forest decline[J]. Tropical and Subtropical Soil Science, 1995(4): 246-249.]

[8] 周志田, 成升魁, 刘允芬. 中国亚热带红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤CO_2排放规律初探[J]. 资源科学, 2002, 24(2): 83-87. [Zhou Zhitian, Cheng Shengkui, Liu Yunfen, et al. CO_2 emission of soil under different land-use types in subtropical red soil hilly areas in China: Preliminary exploration[J]. Resources Science, 2002, 24(2): 83-87.]

[9] 程清平, 王平, 徐强. 1960—2013年云南地面温度时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 111-121, 397. [Cheng Qingping, Wang Ping, Xu Qiang. Temporal and spatial variation characteristics of surface temperature in Yunnan during 1960-2013[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6): 111-121, 397.]

[10] 王雪姣, 王森, 吉春容, 等. 1961—2015年新疆0 cm地温的时空分布特征及突变分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(4): 165-169. [Wang Xuejiao, Wang Sen, Ji Chunrong, et al. Spatial-temporal characteristics and mutation analysis of ground temperature in Xingjiang from 1961 to 2015[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(4): 165-169.]

[11] 张威, 纪然. 辽宁省地表温度时空变化及影响因素分析[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 1-13. [Zhang Wei, Ji Ran. Analysis of spatio-temporal variation and factors influencing surface temperature in Liaoning Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): 6772-6784.]

[12] Huang L, Liu J, Shao Q, et al. Changing inland lakes responding to climate warming in Northeastern Tibetan Plateau[J]. Climatic Change, 2011, 109(3/4): 479-502.

[13] 张焕平, 张占峰, 汪青春, 等. 近40年青海浅层地温的变化特征[J]. 中国农业气象, 2013, 34(2): 146-152. [Zhang Huanping, Zhang Zhanfeng, Wang Qingchun, et al. Variation characteristics of shallow soil temperature in Qinghai Province in last 40 years[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(2): 146-152.]

[14] 韩有香, 李国山. 近55年久治县0 cm地温变化特征及成因分析[J]. 青海气象, 2018(4): 45-51. [Han Youxiang, Li Guoshan. Characteristics and causes of ground temperature variation of 0 cm in jiuzhi county in recent 55 years[J]. Qinghai Meteorological, 2018(4): 45-51.]

[15] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 第二版. 北京: 气象出版社, 2007. [Wei Fengying. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Techniques[M]. Second Edition. Beijing: China Meteorological Press, 2007.]

[16] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13: 245-259.

[17] Kendall M G. Rank Correlation Methods[M]. London: Griffin, 1975.

[18] Ding Jin, Cuo Lan, Zhang Yongxin, et al. Monthly and annual temperature extremes and their changes on the Tibetan Plateau and its surroundings during 1963-2015[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 8-14.

[19] Zhang Q, Xu C Y, Chen Y D. Wavelet-based characterization of water level behaviors in the Pearl estuary, China[J]. Stochastic Enviromental Research and Risk Assessment, 2010, 24(1): 81-92.

[20] Liu D L, Liu X Z, Li B C, et al. Multiple time scale analysis of river runoff using wavelet transform for Dagujia River Basin, Yantai, China[J]. Chinese Geographical Science, 2009, 19(2): 158-167.

[21] 程清平, 王平, 谭小爱. 1961—2013年贵州省地面温度时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 122-131. [Cheng Qingping, Wang Ping, Tan Xiaoai. Temporal and spatial variation characteristics of surface temperature in Guizhou during 1961-2013[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 122-131.]

[22] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2002. [Xu Jianhua. Mathematical Methods in Modern Geography[M]. Second Edition. Beijing: Higher Education Press, 2002.]

[23] 孙栋元, 齐广平, 鄢继选, 等. 疏勒河干流降水变化特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 291-303. [Sun Dongyuan, Qi Guangping, Yan Jixuan, et al. Research on variation characteristics of precipitation in the mainstream of Shule River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 291-303.]

[24] 谭娇, 丁建丽, 张钧泳, 等. 1961—2014年新疆北部地区气温时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1181-1191. [Tan Jiao, Ding Jianli, Zhang Junyong, et al. Spatiotemporal variation of temperature in North Xinjiang during the period of 1961-2014 [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1181-1191.]

[25] 冯禹昊, 朱江玲. 基于Morlet小波的辽河径流量变化及其成因分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 208-215. [Feng Yuhao, Zhu Jiangling. Analysis on runoff change and the dring force of the Liaohe River Basin Based on Morlet Wavelet[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 208-215.]

[26] 彭海, 姚宜斌, 雷祥旭. 1979—2014年青藏高原地表温度变化特征分析[J]. 测绘地理信息, 2016, 41(6): 49-53. [Peng Hai, Yao Yibin, Lei Xiangxu. Analysis of surface temperature variation over the Tibetan Plateau from 1979 to 2014[J]. Journal of Geomatics, 2016, 41(6): 49-53.]

[27] 朱伊, 范广洲, 华维, 等. 1981—2015年青藏高原地表温度的时空变化特征分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(11): 127−140. [Zhu Yi, Fan Guangzhou, Hua Wei, et al. Analysis of the temporal and spatial variation in land surface temperature over the Qinghai-Tibet Plateau from 1981 to 2015[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2018, 40(11): 127−140.]

[28] 贾金明, 朱腾冉, 王惠芳, 等. 濮阳市0 cm地温变化特征及成因分析[J]. 气象科技, 2009, 37(3): 330−335. [Jia Jinming, Zhu Tengran, Wang Huifang, et al. Characteristics and causal analysis of ground temperature variation in Puyang[J]. Meteorological Science and Technology, 2009, 37(3): 330−335.]

[29] 李丽, 张正勇, 刘琳, 等. 基于DEM的天山山区气温时空模拟研究[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 855−863. [Li Li, Zhang Zhengyong, Liu Lin, et al. Spatiotemporal distribution of temperature in the Tianshan Mountains based on DEM[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 855−863.]

[30] Guo Bing, Zang Wenqian, Yang Fei, et al. Spatial and temporal change patterns of net primary productivity and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau of China from 2000 to 2015[J]. Journal of Arid Land, 2020, 12(1): 1−17.

Spatial-temporal variation characteristics of land surface temperature in Qinghai Province from 1980 to 2017

ZHAO Meiliang[1,2,3], CAO Guangchao[2,3], CAO Shengkui[1,2,3],
LIU Fugang[4], YUAN Jie[1,2,3], ZHANG Zhuo[1,2,3], DIAO Erlong[1,2,3], FU Jianxin[5]

(1. School of Geographical Science of Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghai, China; 2. Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, Xining 810008, Qinghai, China; 3. MOE Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation, Xining 810008, Qinghai, China; 4. College of Resource, Environment and Planning, Dezhou University, Dezhou 253023, Shandong, China; 5. Institute of Urban and Regional Development, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China)

Abstract: Land surface temperature is an important factor affecting the regional climate, agricultural production, and soil nutrients. It is of great significance to analyze the variation law of ground temperature to understand the causes of climate change and the layout of agricultural production. The characteristics of land surface temperature change and its relationship with the meteorological factor in the Qinghai Province were studied by using linear trend analysis, the Mann-Kendall mutation test, and wavelet analysis based on the data of daily land surface temperature, air temperature, and wind speed data from 35 meteorological stations in the study area from 1980 to 2017. The results showed that: (1) The annual average land surface temperature in Qinghai Province showed a fluctuating and rising trend at a rate of 0.68 °C·$(10a)^{-1}$(P<0.01), and the mutation point was in 2001. There was a significant seasonal difference in the change of surface temperature, and the rate of change was most obvious in winter, which was 0.77 °C· $(10a)^{-1}$ (P<0.01). There was little difference in the other seasons. The average annual land surface temperature of Qinghai Province was based on two periodic changes of 4−7 a and 11−16 a. (2) The average annual land surface temperature of two low-temperature centers in the Qingnan plateau and Qilian mountain area was compared with two high-temperature centers of the Qaidam Basin and Eastern agricultural area, and the rate of temperature increase of the low-temperature center was faster. (3) The annual and quarterly average land surface temperatures had a significant positive correlation with the average temperature but were negatively correlated with wind speed and altitude. (4) The average surface temperature showed an obvious vertical decreasing pattern, and the warming trend was more obvious in areas with high altitude.

Keywords: land surface temperature; spatial-temporal changes; altitude; Qinghai Province